

MEDIÇÃO AUTOMÁTICA DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO ACÚSTICA DE MATERIAIS

HENRIQUE FORLANI MASINI¹; ELIAS BITENCOURT TEODORO²

Resumo: *Este trabalho apresenta como proposta o desenvolvimento de um equipamento portátil capaz de efetuar a medição automática do coeficiente de absorção acústica através do tubo de impedância pelo método de um microfone utilizando o programa computacional labVIEW. A metodologia baseou-se em medições da densidade de energia acústica usando funções transferência como recomendado pela norma ASTM E 1050. Essa técnica recomenda a utilização de dois microfones com casamento de fase. Entretanto, com base em publicações de outros pesquisadores, verificou-se a real possibilidade de utilização de apenas um microfone. Uma bancada experimental foi construída utilizando um gerador de sinais, um microfone e outros equipamentos especificamente projetados e construídos para o experimento, como: uma caixa acústica contendo um alto falante automotivo, um tubo de impedância circular em PVC contendo uma série de furos devidamente espaçados para acomodar o microfone e um amplificador de potência para o gerador de sinais. Os sinais adquiridos foram processados por um computador com um programa computacional analisador de sinais desenvolvido em LabVIEW. Com a construção e validação da metodologia e do sistema de medição, verifica-se uma otimização da capacidade laboratorial na medição de coeficiente de absorção de diversos materiais em faixas de frequências de 75 a 4650 Hz.*

Palavras chaves: coeficiente de absorção acústica; tubo de impedância; função transferência.

¹ Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Campus Santa Mônica, CEP 38400-902, Uberlândia, MG, henriquemasini@yahoo.com.br

² Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Campus Santa Mônica, CEP 38400-902, Uberlândia, MG (orientador), teodoro@mecanica.ufu.br

AUTOMATIC MEASUREMENT OF THE ACOUSTIC ABSORPTION COEFFICIENT OF MATERIALS

Abstract: *This paper presents the proposal of the development of a portable equipment that can be taken to different places to perform automatic measurements of the acoustic absorption coefficient through the impedance tube using the one microphone method and LabVIEW software. The methodology is based on measurements of the acoustic energy density using the frequency response function as recommended by ASTM E 1050. This technique recommends the use of two microphones with phase matching condition. However, based on another's researcher's publications, the real possibility of using only one microphone was verified. An experimental workbench was developed using one signal generator, one microphone and other equipment specifically designed and developed for the experiment, as an acoustic box with an automotive loudspeaker, a circular PVC impedance tube containing a series of holes properly spaced to accommodate the microphone and a power amplifier for the signal generator. The acquired signals were processed by a computer with a signal analyzer software developed in LabVIEW. With the development and validation of the methodology and measurement system there is an optimization of laboratory capacity to measure the absorption coefficient of several alternative materials in the frequency range from 75 to 4650 Hz*

Key-Words: *impedance tube, transfer function, sound absorption coefficient.*

Introdução

Ruído é caracterizado como sendo um som desagradável e indesejável que pode provocar efeitos nocivos no sistema auditivo e no sistema extra-auditivo do organismo humano (Araújo et al., 2002).

Por causa do efeito maléfico ao ser humano, é necessária a redução dos níveis de ruído em indústrias, escritórios, residências e escolas de tal forma que o ambiente se torne confortável do ponto de vista acústico. Essa redução pode ser efetuada com a utilização de materiais que absorvam o som desagradável.

Os materiais tipicamente utilizados para absorver o som são fibrosos ou porosos. A absorção se dá pela dissipação de energia acústica por atrito, devido ao movimento das moléculas de ar no interior do material, quando ocorre a passagem da onda sonora (Bistafa,

2006). Assim, como os materiais sólidos não permitem que as moléculas de ar interajam com a sua estrutura, a absorção sonora é drasticamente reduzida.

O parâmetro que determina as características de absorção acústica de um material é o coeficiente de absorção acústica (α) e é definido como sendo a razão entre a energia acústica absorvida e a energia acústica incidente.

Existem basicamente dois métodos para a medição do coeficiente de absorção sonora: em uma câmara de testes especial, denominada de câmara reverberante, e o tubo de impedância. O coeficiente de absorção normalmente utilizado nas aplicações é aquele obtido experimentalmente em câmara reverberante (Bistafa, 2006). Nas câmaras reverberantes, as superfícies são construídas de tal forma a maximizar o som refletido, conforme mostra a figura 01.

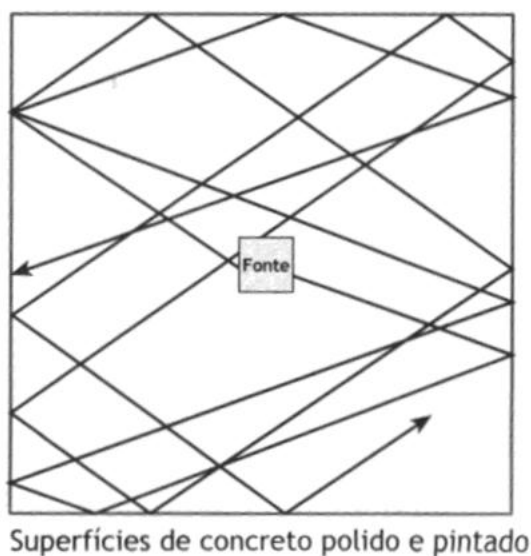


Figura 01 – Câmara reverberante

Assim, o método de medição do coeficiente de absorção acústica através do tubo de impedância não necessita de uma câmara reverberante e sendo assim, é mais barato e de mais fácil implementação.

O tubo de impedância consiste de um tubo de parede rígida onde numa das extremidades é colocado um alto-falante e na outra a amostra do material a ser testado. Dentro do tubo é estabelecido um modelo de ondas estacionárias, devido às ondas que vão à direção da amostra e retornam.

O valor do coeficiente de absorção depende da frequência do som incidente, da densidade, da espessura e da estrutura dos materiais e sempre varia de 0 a 1. Uma curva típica pode ser observada na figura 02 para materiais absorventes.

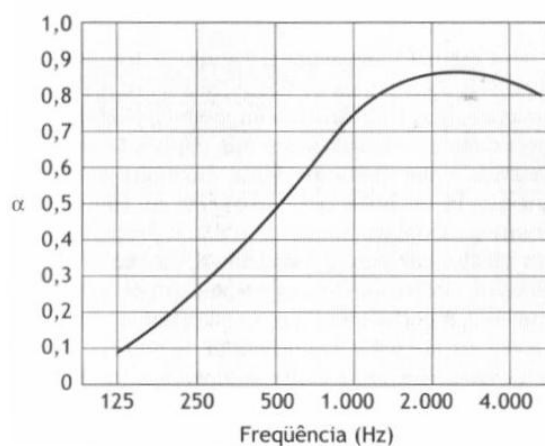


Figura 02 – Curva típica do coeficiente de absorção sonora.

Diante do contexto apresentado, o objetivo deste trabalho é projetar, desenvolver e validar um equipamento portátil capaz de efetuar a medição do coeficiente de absorção acústica através do tubo de impedância utilizando o método de um microfone, de tal forma a otimizar a capacidade laboratorial de medição para diversos materiais na faixa de frequência de 75 a 4650 Hz.

Metodologia

Existem basicamente dois métodos para a determinação do coeficiente de absorção acústica de materiais utilizando o tubo de impedância: o método clássico analógico e o digital.

No método analógico, em uma das extremidades do tubo é colocado um alto falante e na outra extremidade é colocado o material a ser testado seguido por uma tampa, conforme pode-se observar na figura 03.

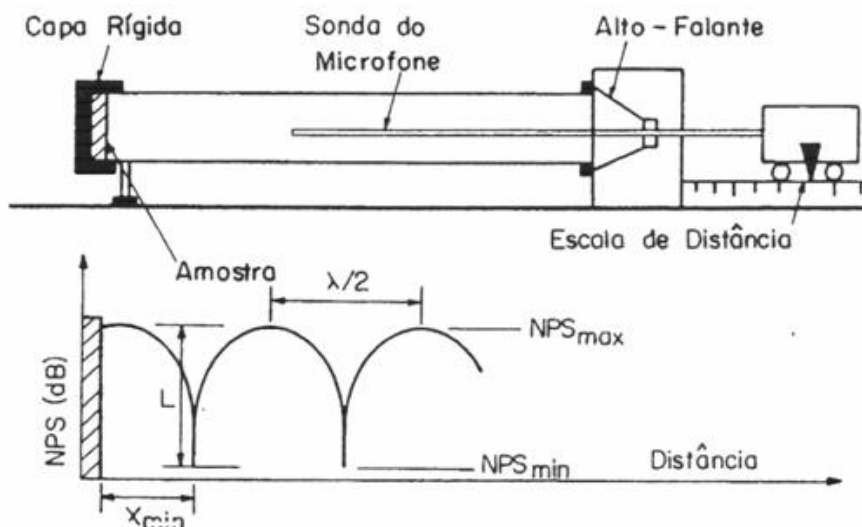


Figura 03 - Método analógico para a construção do tubo de impedância

De tal forma a se obter uma pressão sonora máxima e mínima, o microfone pode ser deslocado ao longo do tubo. Ao se ligar o alto-falante, ondas estacionárias são formadas no interior do tubo. Com isso, o valor da razão de onda estacionária pode ser encontrado, e, assim, é possível determinar o coeficiente de absorção acústica.

O método clássico possui algumas limitações como:

1. Ondas incidentes normais (90°) à superfície da amostra.
2. Excitação acústica com frequências puras (não com bandas de frequências).
3. Frequências até 1900 Hz para amostras com 10 cm de diâmetro e frequências entre 1900 e 6300 Hz para amostras com 3 cm de diâmetro, havendo o perigo de uma amostra pequena não ser significativa.

Com o desenvolvimento da técnica de análise digital dos sinais nos últimos anos, o método clássico deu lugar ao método digital. O coeficiente de absorção acústica no método digital pode ser determinado cerca de 20 a 30 vezes mais rápido e tornou-se possível determinar o coeficiente de absorção cobrindo-se uma banda de frequências praticamente contínua, enquanto que no método clássico o coeficiente de absorção era obtido para frequências discretas.

No método digital um ruído branco, que é um ruído que possui distribuição de energia constante com a frequência, é gerado e a pressão sonora no interior do tubo é determinada por dois microfones em posições pré-determinadas. Os sinais dos microfones são simultaneamente processados por um analisador digital e a curva de absorção em função da frequência é determinada. Mas é possível utilizar a técnica do tubo de impedância com apenas

um microfone. O processo de excitação do tubo com um ruído branco pode ser considerado estacionário e, portanto, os sinais dos microfones não precisam ser processados simultaneamente (Chu, 1986).

Assim, apenas um microfone pode ser utilizado para efetuar medições em duas posições selecionadas e, com isso, elimina-se o processo de calibração entre os dois microfones, os erros associados à diferença de fase de cada um e as dificuldades computacionais. A técnica de determinação do coeficiente de absorção acústica utilizando um microfone pode ser automatizada de tal modo que seja projetado um equipamento portátil que possa ser transportado para vários lugares para que sejam efetuadas as medições.

Um sistema de medição automático é constituído pelo tubo de impedância, no qual possui em uma de suas extremidades um alto falante e a outra extremidade é fechada por uma tampa onde se coloca a amostra de material, um gerador de sinais ligado a um amplificador que é ligado ao alto falante, uma placa de aquisição de dados, um computador que possua um software com um analisador digital de sinais e um microfone ligado a um pré-amplificador, conforme a figura 04.

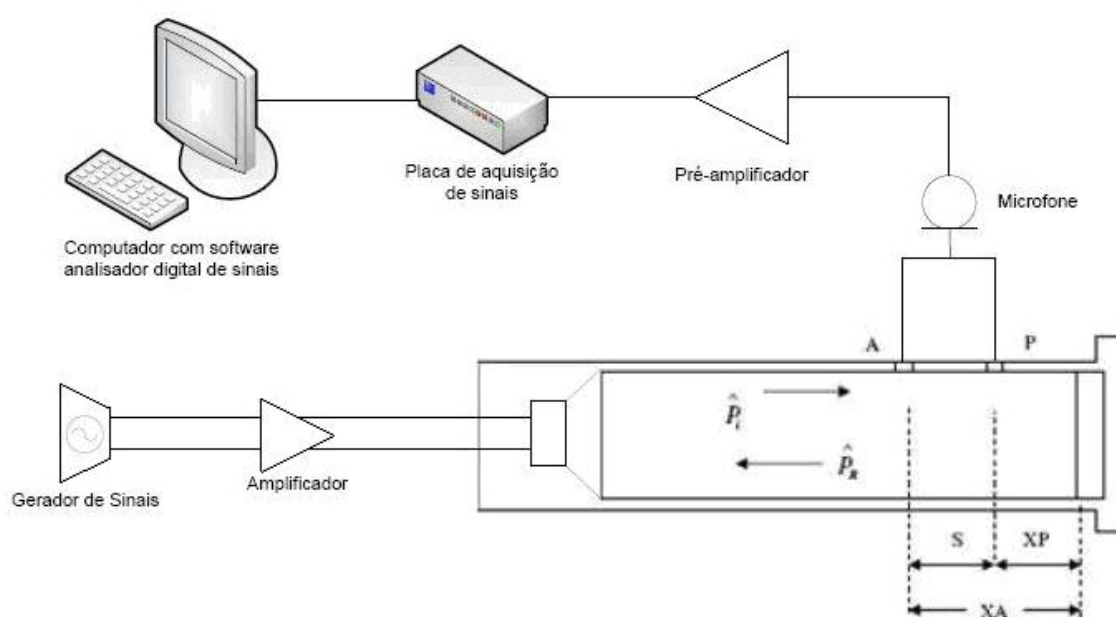


Figura 04 – Sistema automático de medição do coeficiente de absorção acústica.

Para se determinar o coeficiente de absorção acústica, é necessário encontrar o valor da função de transferência entre os sinais obtidos na posição A e na posição P da figura 04 respectivamente. A função de transferência entre os sinais é a razão entre a pressão acústica

da onda que se forma no interior do tubo entre as posições P e A. Tem-se que, conforme as equações para uma onda plana, a pressão no ponto P e a pressão no ponto A pode ser dada por:

$$P_P = e^{i\omega t} \left[A e^{ikx_P} + B e^{-ikx_P} \right] \quad (01)$$

$$P_A = e^{i\omega t} \left[A e^{ikx_A} + B e^{-ikx_A} \right] \quad (02)$$

Em que A e B são as amplitudes das ondas incidente e refletida respectivamente, k é o número de onda dado por $k = \omega/c$, e c é a velocidade de propagação do som no ar. Portanto, a função de transferência ou função de resposta em frequência pode ser dada por:

$$H_{AP} = \frac{P_P}{P_A} = \frac{\left[A e^{ikx_P} + B e^{-ikx_P} \right]}{\left[A e^{ikx_A} + B e^{-ikx_A} \right]} \quad (03)$$

Com isso, o módulo da razão das amplitudes pode ser dado por:

$$\left| \frac{B}{A} \right| = \left| \frac{H_{AP} - e^{-iks}}{e^{iks} - H_{AP}} \right| \quad (04)$$

O coeficiente de reflexão acústica pode ser representado pela relação entre a intensidade sonora incidente e a intensidade sonora refletida de tal modo que:

$$\alpha_r = \frac{I_r}{I_I} = \frac{P_r^2}{P_I^2} = \left| \frac{B}{A} \right|^2 \quad (05)$$

Considerando-se que a energia sonora transmitida através da tampa é nula, tem-se que, pela lei da conservação de energia, no qual a energia incidente é igual à energia absorvida mais a energia refletida, o coeficiente de absorção acústica pode ser dado por:

$$\alpha = 1 - \alpha_r = 1 - \left| \frac{B}{A} \right|^2 \quad (06)$$

Substituindo-se a Eq. 04 na Eq. 06, o coeficiente de absorção acústica será dado por:

$$\alpha = 1 - \left| \frac{H_{AP} - e^{-iks}}{e^{iks} - H_{AP}} \right|^2 \quad (07)$$

Portanto, uma vez definida a distância entre as posições de medição s , deve ser obtida a função de transferência entre os sinais A e P, de tal modo que ela pode ser dada por (Chu, 1986):

$$H_{AP} = \frac{P_p(f)}{P_A(f)} = \frac{G_{AP}(f)}{G_{AA}(f)} \quad (08)$$

Onde $P_p(f)$ e $P_A(f)$ são as transformadas de Fourier do sinal no tempo e $G_{AP}(f)$ é o espectro cruzado de $P_A(f)$ e $P_p(f)$, e $G_{AA}(f)$ é o espectro de potência de $P_A(f)$.

A Eq. 08 ainda pode ser escrita da seguinte forma:

$$H_{AP} = H_{AS}H_{SP} \quad (09)$$

No qual H_{AS} é a função de transferência entre o sinal do microfone na posição A e o sinal do gerador e H_{SP} é a função de transferência entre o sinal do gerador e o sinal do microfone na posição P. Como o processo pode ser considerado estacionário (Chu, 1986), H_{AS} e H_{SP} não precisam ser determinados simultaneamente. Assim, um único microfone é necessário para medir as pressões nas posições A e P e com a equação acima, é calculada a função de transferência necessária para o cálculo do coeficiente de absorção acústica.

Para a teoria apresentada até agora, as medições só serão válidas para a faixa de frequência na qual só existam ondas planas no interior do tubo. Essa frequência é definida como frequência de corte, e em um duto uniforme de seção transversal circular, a menor frequência de corte vale:

$$f_c = \frac{1,84c}{\pi d} \quad (10)$$

Onde d é o diâmetro externo do tubo em metros. Assim, acima dessa frequência de corte, os resultados não devem ser considerados porque as ondas que se propagam no tubo não são somente ondas planas.

O espaçamento entre as posições do microfone s define a faixa de frequência no qual as medições têm precisão aceitável (Gerges, 2000). As frequências máxima e mínima da faixa recomendada para o uso em função da distância entre os microfones são:

$$f_{\max} < \frac{0,8c}{2s} \quad (11)$$

$$f_{\min} > \frac{0,1c}{2s} \quad (12)$$

Pode-se determinar também a frequência ideal de trabalho em torno da qual, espera-se uma menor variância dos resultados:

$$f_i = \frac{c}{4s} \quad (13)$$

Assim, para o cálculo do coeficiente de absorção sonora para uma dada frequência deve ser levado em conta a distância s entre as posições do microfone de tal forma que o resultado apresente a menor variância possível.

Outro parâmetro também importante é o NRC (*Noise Reduction Coefficient* – Coeficiente de redução sonora) que pode ser definido como sendo a média aritmética dos coeficientes de absorção sonora das bandas de oitava de 250 a 2000 Hz.

$$NRC = \frac{1}{r} (\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}) \quad (14)$$

É importante determinar também a função coerência durante as medições do coeficiente de absorção acústica. Essa função varia entre 0 e 1 e mede o grau de causalidade entre dois sinais quaisquer (Gerges, 2000). Ela pode ser utilizada para determinar a validade da função

de transferência encontrada de tal forma que assim, a confiabilidade do cálculo do coeficiente de absorção acústica possa ser verificada. A função de coerência é dada por:

$$\lambda_{AP}^2 = \frac{|G_{AP}|^2}{G_{AA} G_{PP}} \quad (15)$$

Através da técnica de um microfone, não é possível determinar a função de coerência de forma direta. Portanto, utiliza-se:

$$\lambda_{AP}^2 = \lambda_{AS}^2 \lambda_{SP}^2 \quad (16)$$

Onde as funções λ_{AS} e λ_{SP} são determinadas quando o microfone ocupar as posições A e P respectivamente.

Outra consideração importante é que quando a distância s coincide com um múltiplo de meio comprimento de onda, a pressão sonora do tubo deve ser igual nas duas posições de medição, estabelecendo assim, uma indeterminação no cálculo do coeficiente de absorção sonora, de tal modo que a curva do coeficiente de absorção apresenta grandes variações para a frequência correspondente a meio comprimento de onda.

Assim, verifica-se que para distâncias s menores, é mais adequada a medição em altas frequências e para distâncias s maiores, é mais adequada a medição em baixas frequências.

Materiais e construção do sistema de medição

Para a construção do tubo de impedância, madeira foi utilizada para a caixa com o alto falante, o suporte e a tampa que contém a amostra de material a ser testada, conforme é mostrado na Fig. 05. Já o tubo foi construído com PVC.

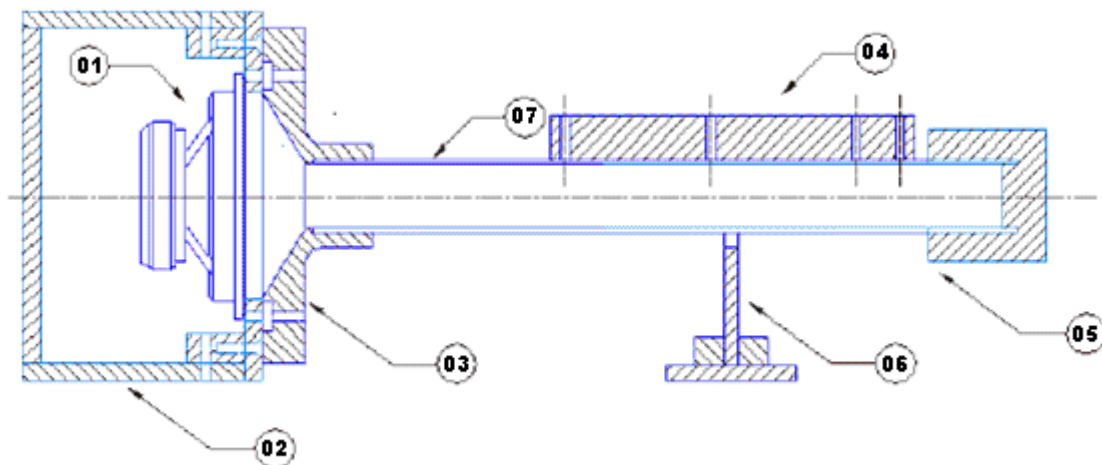


Figura 05 – Modelo construtivo do tubo de impedância

Onde:

1 – Alto falante; 2 – Caixa acústica; 3 – Conexão entre o tubo e a caixa acústica; 4 – Fixação do microfone; 5 – Porta amostra; 6 – Apoio; 7 – Tubo.

O sistema de medição automático do coeficiente de absorção acústica de materiais também conta com um gerador de sinais da SRS (Stanford Research Systems) modelo DS360, um amplificador de potência especificamente projetado para o projeto, um microfone e uma placa de aquisição de dados.

Assim, os microfones são ligados a um dos furos localizados na parte superior do tubo e conectados a uma placa de aquisição de dados que por sua vez é ligada ao computador e com isso é possível analisar o sinal do microfone com um programa computacional em LabVIEW. O tubo de impedância desenvolvido pode ser observado na figura 06.

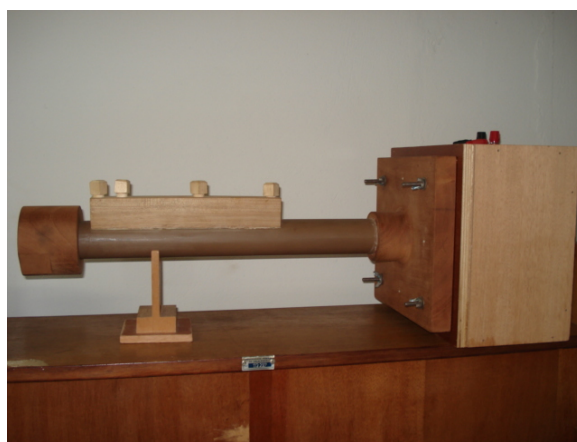


Figura 06 – Tubo de impedância

Resultados

A partir da metodologia adotada, foram desenvolvidos dois programas em LabVIEW. No primeiro programa, o sinal do microfone e do gerador é adquirido e a partir da frequência máxima desejada, taxa de amostragem, número de pontos e número de médias desejadas, as funções de transferência H_{AS} e H_{SP} são determinadas em duas posições distintas do tubo e são salvas em um arquivo. A interface projetada pode ser observada na Fig. 07.

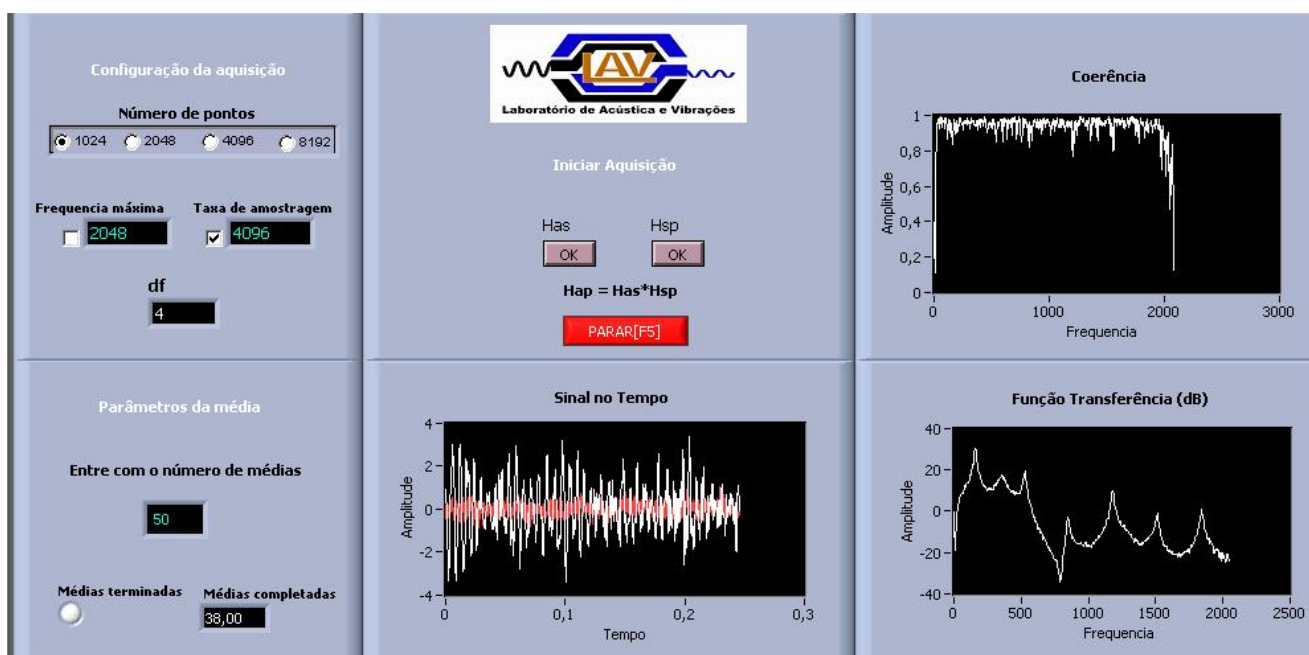


Figura 07 – Interface do programa para a aquisição do sinal

Com isso, no segundo programa, o coeficiente de absorção é calculado para uma determinada distância s do tubo de impedância, através dos dados carregados do arquivo salvo pelo primeiro programa. Assim, a partir da Eq. 09, a função transferência H_{AP} é determinada e com isso o coeficiente de absorção acústica para uma determinada amostra é encontrado. A interface do programa que faz o cálculo do coeficiente de absorção para uma determinada amostra é mostrada na Fig. 08.

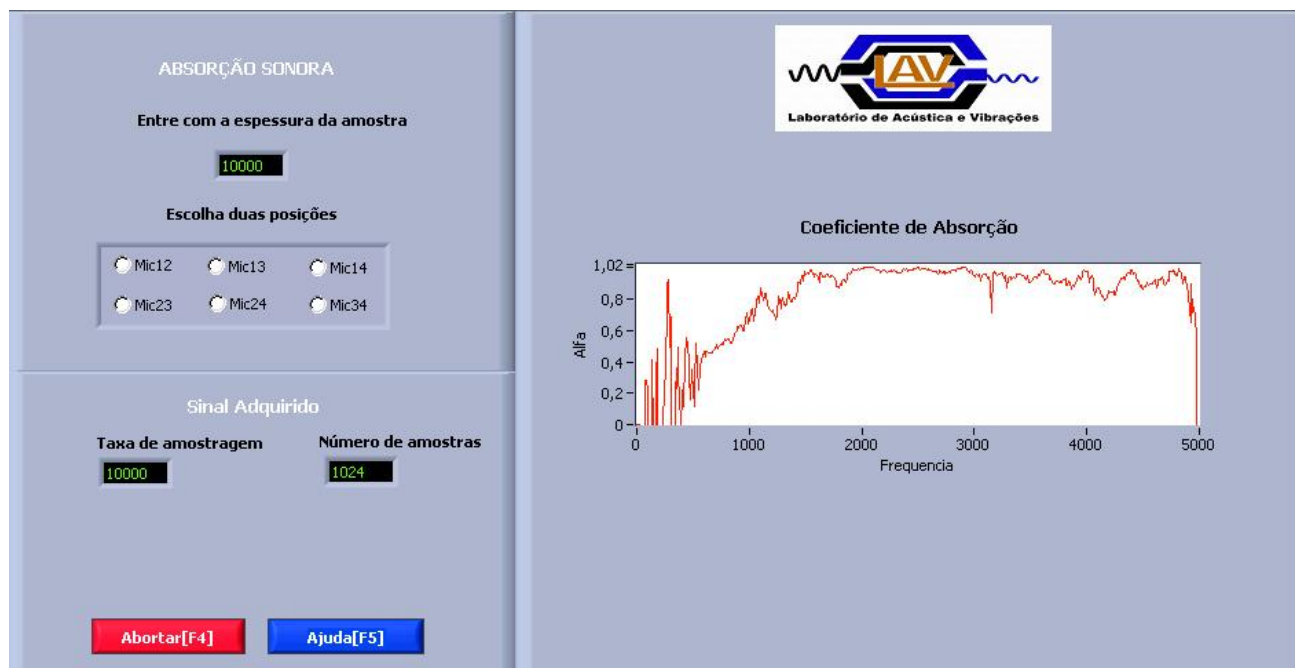


Figura 08 – Interface do programa para o cálculo do coeficiente de absorção acústica.

Na Tab. 01 pode-se observar o valor da frequência de corte, encontrada a partir da Eq. (10), sabendo-se que o tubo tem um diâmetro externo de 40 mm e considerando-se que a velocidade do som é de 343 m/s (assumindo um modelo simplificado para o ar a 20°C).

Tabela 01 – Frequência de corte do tubo de impedância

Diâmetro externo do tubo [mm]	Frequência de corte [Hz]
40	5022,3

A partir das equações 11, 12 e 13, tem-se a frequência máxima e mínima para o uso em função da distância s entre cada posição de microfone e a frequência ideal de trabalho, conforme mostra a Tab. 02.

Tabela 02 - Frequência máxima, mínima e ideal em função da distância entre os microfones.

s [mm]	f_{\max} [Hz]	f_{\min} [Hz]	f_i [Hz]
29,5	4650,84	581,35	2906,78
133,1	1030,8	128,85	644,25

228,1	601,49	75,18	375,93
103,6	1324,32	165,54	827,70
198,6	690,83	86,35	431,77
95,0	1444,21	180,52	902,63

Assim, pode-se observar que o sistema de medição possui como faixa de uso confiável para as medições, de 75,18 a 4650,84 Hz, que é menor do que a frequência de corte do tubo de 5022,3 Hz.

Os três tipos de materiais de absorção sonora mais utilizados são: espuma de polímeros, lã de vidro e lã de rocha.

Inicialmente foi analisada uma amostra de lã de vidro. A lã de vidro é um material muito utilizado em diversas aplicações de melhoria acústica de recintos e as suas propriedades acústicas são bem conhecidas. Existem muitas formas disponíveis no mercado, como painéis, mantas e feltros. Uma manta de lã de vidro pode ser observada na Fig. 09.



Figura 09 – Manta de lã de vidro

A curva de absorção acústica encontrada para essa amostra para $s = 29,5 \text{ mm}$ pode ser observada na Fig. 10 cuja faixa de frequência de uso está mostrada na Tab. 02.

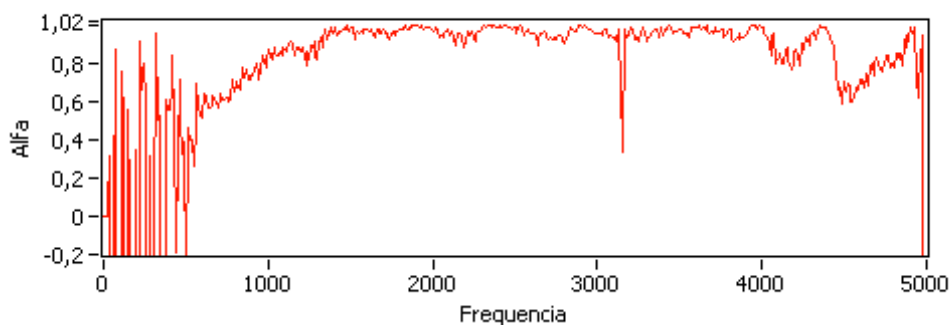


Figura 10 - Coeficiente de absorção acústica para a lã de vidro com $s = 29,5 \text{ mm}$.

Pode-se observar na Fig. 10, que para valores menores do que 581,35 Hz existem grandes variações nos valores dos coeficientes de absorção, conforme o esperado.

Observa-se, ainda, a existência de um grande decréscimo no valor do coeficiente de absorção próximo de 3000 Hz. Isso pode ser explicado pela função de coerência entre o sinal do microfone e o sinal do alto-falante durante a obtenção da função de transferência, que verifica a validade da estimativa da função obtida.

A função coerência pode ser observada na figura 11. A partir da Fig. 11, verifica-se que na frequência de cerca de 3000 Hz, a função coerência possui o valor de aproximadamente 0,2. Verifica-se também que a frequência de 3000 Hz corresponde a um comprimento de onda de $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{343}{3000} = 0,1143$. Assim, sabendo-se que $\lambda/4 = 0,0285$ m e que a posição s entre as posições do microfone é de 29,5 mm ou 0,0295 m, então o primeiro nó da onda estacionária relativa a 3000 Hz, praticamente coincide com a referida posição de medição.

Tal decréscimo pode ser considerado um erro aleatório e mostrar grande variação quando um experimento é repetido (Gerges, 2000).

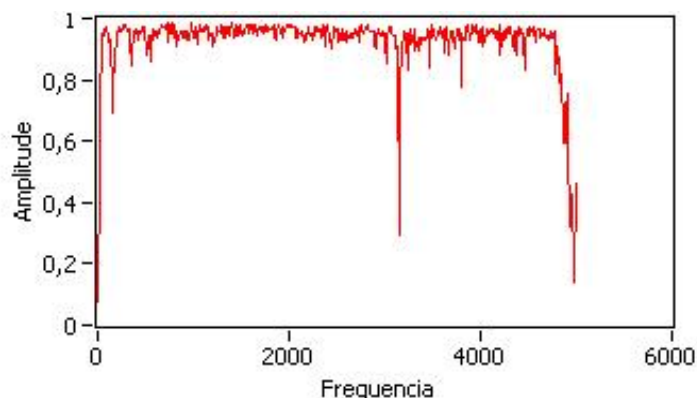


Figura 11 – Função coerência para $s = 29,5$ mm.

A partir da tabela 02, pode-se observar que a frequência de uso para $s = 133,1$ mm ocorre para um intervalo de frequências menores do que para $s = 29,5$ mm. Conforme pode-se observar na Fig. 12, para frequências baixas ocorre uma grande variação nos resultados. Entretanto tal variação ocorre em frequências menores do que para $s = 29,5$ mm, conforme esperado. E para frequências maiores do que 1030,8 Hz, os resultados não devem ser utilizados, visto que estão fora da faixa de frequência de uso. Observa-se uma pequena variância em torno de 644,25 Hz, que é a frequência ideal de trabalho para esse espaçamento.

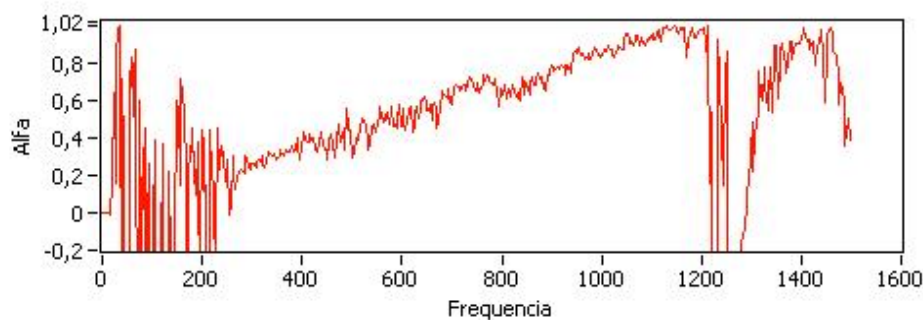


Figura 12 - Coeficiente de absorção da lã de vidro para $s = 133,1$ mm.

Assim, a partir de medições para diferentes valores de s , é possível chegar a valores confiáveis do coeficiente de absorção acústica para determinadas bandas de frequência. Com isso, chega-se à Tab. 03 com os valores do coeficiente de absorção acústica e o NRC para a amostra de lã de vidro utilizada.

Tabela 03 – Valores do coeficiente de absorção acústica e o NRC para a amostra de lã de vidro

250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]	NRC
0,2	0,53	0,87	0,98	0,98	0,645

Outro material bastante utilizado em aplicações para a redução de ruído é a lã de rocha. A lã de rocha é obtida pela fusão de diversos elementos de rocha e/ou escória a uma temperatura de cerca de 1500°C , para a obtenção de fibras que são posteriormente aglutinadas por uma resina para a formação de uma manta ou painel.

A Fig. 13 mostra uma manta de lã de rocha empregada em diversas aplicações comerciais.



Figura 13 – Manta de lã de rocha

A Fig. 14 mostra o gráfico do coeficiente de absorção encontrado para quando s é igual a 133,1 mm. Conforme podemos observar a partir da tabela 02, a frequência de uso para esse espaçamento é entre 128,85 e 1030,8 Hz. Assim, observa-se que para a frequência em torno de 1200 Hz, existe uma grande variação nos resultados. Isso pode ser explicado sabendo-se que a posição do nó da onda estacionária para a frequência de 1200 Hz, praticamente coincide com a posição de medição ($s = 133,1 \text{ mm}$).

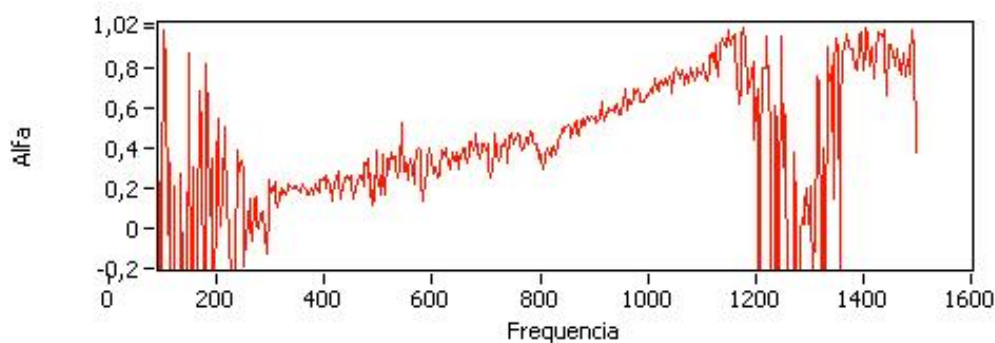


Figura 14 - Coeficiente de absorção sonora da lâmina de rocha para $s = 133,1 \text{ mm}$.

Assim, a partir de várias medições com a lâmina de rocha para os diferentes espaçamentos, verificando as faixas confiáveis de frequência de uso para cada espaçamento, chegou-se à tabela 04.

Tabela 04 – Valores do coeficiente de absorção acústica e o NRC para a amostra de lâmina de rocha

250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]	NRC
0,11	0,25	0,6	0,98	1	0,485

Foi analisada também uma placa de fibra mineral modelada que, de acordo com o fabricante, possui $2,93 \text{ kg/m}^2$ de densidade e um NRC mínimo de 0.55, como mostrado na Fig. 15.

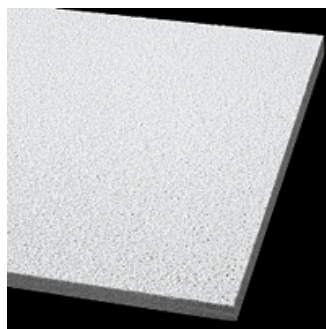


Figura 15 – Forro Acústico

O coeficiente de absorção acústica para esse forro pode ser observado na figura 16 para $s = 103,6 \text{ mm}$. Para esse espaçamento, a faixa de frequência de uso está entre 165,54 e 1324,32 Hz.

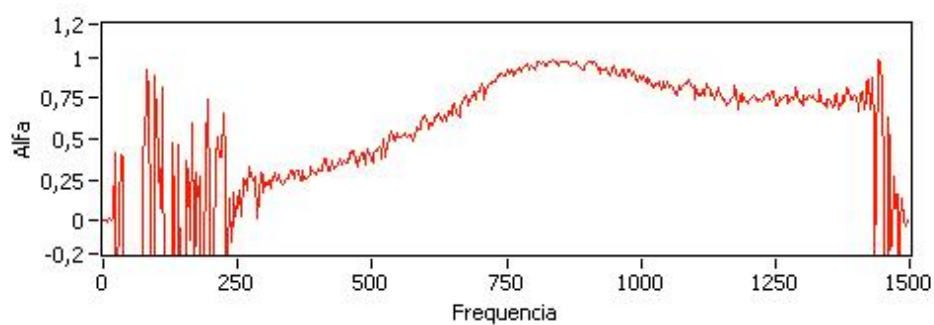


Figura 16 – Coeficiente de absorção acústica para o forro com $s = 103,6 \text{ mm}$.

A figura 17 mostra o coeficiente de absorção para $s = 29,5 \text{ mm}$. Pode-se notar que todas as amostras testadas até agora são de materiais absorventes, mas a lã de vidro e a lã de rocha possuem uma melhor absorção em alta frequência do que o forro acústico.

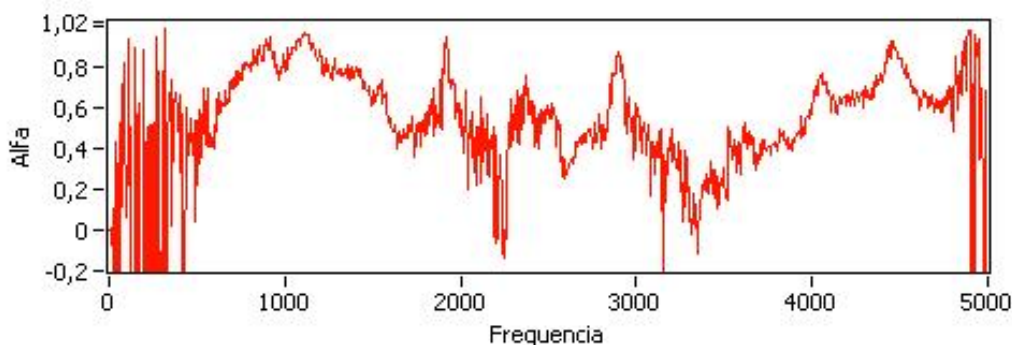


Figura 17 – Coeficiente de absorção acústica para o forro com $s = 29,5$ mm.

Na tabela 04 podemos observar os valores do coeficiente de absorção medidos para essa placa, juntamente com o valor do NRC, no qual se pode notar que é muito próximo do fornecido pelo fabricante.

Tabela 04 – Valores do coeficiente de absorção acústica e o NRC para o forro acústico com $s = 29,5$ mm

250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]	NRC
0,27	0,38	0,89	0,64	0,48	0,545

Por fim, foi medido também como parâmetro de comparação o coeficiente de absorção acústica de uma amostra de aço. Como o aço é um material sólido, este deve ter um baixo coeficiente de absorção, visto que os materiais sólidos não permitem que as moléculas de ar interajam em sua estrutura de tal forma que a dissipação de energia acústica por atrito é pequena. Com isso, a curva do coeficiente de absorção pode ser observada na Fig. 18.

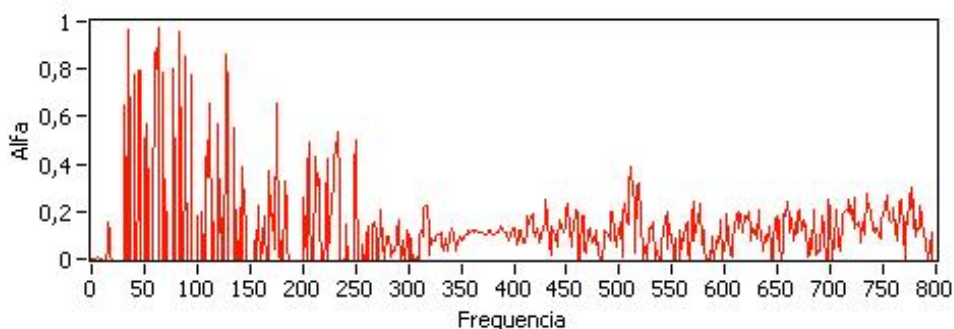


Figura 18 – Coeficiente de absorção sonora de uma amostra de aço.

Para essa medição, foi utilizado $s = 133,1 \text{ mm}$ com uma frequência máxima de 800 Hz. Conforme esperado, o coeficiente de absorção é muito baixo, se comparado aos outros materiais absorventes testados anteriormente. A grande variância observada nas baixas frequências está relacionada com a frequência de uso para esse espaçamento, conforme mostra a tabela 02.

Conclusão

Foi projetado, construído e validado um equipamento para a medição do coeficiente de absorção acústica de diversos materiais absorventes ou materiais que possam ser utilizados como alternativa aos já existentes no mercado em uma faixa de frequência de aproximadamente 75, 18 a 4650,84 Hz.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio no projeto número C-017/2008 PIBIC com bolsa ao discente, bem como ao suporte do Laboratório de Acústica e Vibrações (LAV) na construção do tubo de impedância e fornecimento dos equipamentos e programa computacional.

Referências Bibliográficas

Araújo G.M. Regazzi R.D., *Perícia e Avaliação de Ruído e Calor Passo a Passo – Teoria e Prática*, Rio de Janeiro, 2ª Ed., 2002.

Bistafa, S.R., A.R., *Acústica Aplicada ao Controle de Ruído*, Editora Edgard Blücher, 1ª Ed., 2006.

Chu, W. T., *Transfer function technique for impedance and absorption measurements in the impedance tube using a single microphone*. Journal of Acoustical Society of America, New York, 80 (2): 555-60 Aug. 1986.

Everest F.A., *Master Handbook of Acoustics*, Fourth Edition, McGraw-Hill, 2001.

GERGES, S. N. Y., *RUÍDO - Fundamentos e Controle*, Imprensa Universitária da UFSC, Florianópolis, 2ª Ed., 2000.

Giampaoli, Eduardo, *Características de absorção acústica de tijolos transformados em absorventes de ruídos de baixa frequência*. Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica. Florianópolis, Julho de 1987.

KINSLER, L.E., FREY A.R., COPPENS A.B. and SANDERS J.V., *Fundamentals of Acoustics*, Third Edition, John Wiley & Sons, 1982.